

УДК538.9:536.6

ЕФЕКТИВНІСТЬ ВИКОРИСТАННЯ ПОЛІМЕРНИХ МІКРО- І НАНОКОМПЗИТІВ ДЛЯ ТЕПЛООБМІННИХ АПАРАТІВ ГАЗО-ГАЗОВОГО ТИПУ

Фіалко Н.М.¹, член-кореспондент НАН України, Навродська Р.О.¹, канд. техн. наук, Дінжос Р.В.², канд. фіз.-мат. наук, Меранова Н.О.¹, канд. техн. наук, Шевчук С.І.¹, канд. техн. наук

¹Інститут технічної теплофізики НАН України, вул. Желябова, 2 а, Київ, 03680, Україна

²Миколаївський національний університет ім. В.О.Сухомлинського, вул. Нікольська, 24, Миколаїв, 54030, Україна

Наведено результати аналізу перспективності використання полімерних мікро- і нанокомпозитів для виготовлення газо-газових теплообмінників. Представлено дані зіставлення характеристик теплообмінних поверхонь з полімерних композитів з відповідними показниками для традиційно застосовуваних поверхонь.

Приведены результаты анализа перспективности использования полимерных микро- и нанокомпозитов для изготовления газо-газовых теплообменников. Представлены данные сопоставления характеристик теплообменных поверхностей из полимерных композитов с соответствующими показателями для традиционно применяемых поверхностей.

The results of the analysis of the prospects for the use of polymer micro- and nanocomposites for the fabrication of gas-gas heat exchangers are given. The data of comparison of heat exchange characteristics of polymer composites surfaces with corresponding parameters for traditionally applied surfaces are presented.

Бібл. 11, табл. 1, рис. 7.

Ключові слова: полімерні мікро- і нанокомпозити, теплообмінні поверхні, вуглецеві нанотрубки.

C^* – відносна собівартість (собівартість теплообмінної поверхні на одиницю теплопродуктивності);

Q^* – питома теплопродуктивність (теплопродуктивність на одиницю маси теплообмінної поверхні);

V^* – відносний об'єм (об'єм теплообмінної поверхні на одиницю теплопродуктивності);

t_r^H – температура димових газів у номінальному режимі;

t_{nc} – температура навколишнього середовища;

$t_{пов}^{max}$ – максимальне значення температури теплообмінної поверхні;

λ – коефіцієнт теплопровідності матеріалу;

ω – масова частка наповнювача;

КТП – кільцеві турбулізатори потоку;

ВНТ – вуглецеві нанотрубки.

Вступ

Проблеми надійності і довговічності теплоенергетичного устаткування та підвищення його ефективності набувають останнім часом все більшого значення. Вирішення цих проблем безпосередньо пов'язано з застосуванням нових матеріалів, що мають покращені технологічні і фізичні властивості. До таких матеріалів належать, зокрема, полімерні мікро- і нанокомпозити, що характеризуються комплексом властивостей, за рівнем яких вони можуть значно перевершувати традиційні матеріали [1-5].

Серед перспективних напрямів використання полімерних мікро- і нанокомпозитів виділяється їх застосування в теплообмінних апаратах різного типу. При цьому обґрунтований вибір необхідних полімерних композитів, очевидно, має ґрунтуватися на порівняльному аналізі ефективності теплообмінних апаратів з даних композитів і традиційно застосовуваних матеріалів.

Дана стаття присвячена аналізу перспективності використання полімерних мікро- і нанокомпозитів для виготовлення теплообмінних апаратів газо-газового типу. Застосування цих композитів має особливу доцільність при експлуатації теплообмінних

апаратів в умовах дії агресивних середовищ. Це пов'язано з підвищеною корозійною стійкістю даних матеріалів. Окрім того, теплообмінні поверхні з полімерних композиційних матеріалів можуть мати суттєві переваги над відповідними поверхнями з традиційно застосовуваних корозійностійких сталей за питомою теплопродуктивністю, масогабаритами, ціновими показниками тощо.

Постановка завдань і методика проведення досліджень

Мета роботи полягає у порівняльному аналізі ефективності використання полімерних мікро- і нанокомпозитів і традиційно застосовуваних матеріалів для газо-газових теплообмінників. Як приклад розглядалися теплообмінні поверхні повітрогрійних утилізаторів теплоти відхідних газів котельних установок за умови їх глибокого охолодження.

Характеристики теплообмінних поверхонь з полімерних мікро- і нанокомпозитів порівнювалися з відповідними показниками для поверхонь, традиційно застосовуваних в таких ситуаціях. Дані зіставлення проводилися за умови однакових теплогідрравлічних режимів роботи теплообмінних апаратів, тобто при

тих самих теплопродуктивностях, діапазонах робочих температур і тисків, витратах теплоносіїв тощо. При цьому порівняльний аналіз традиційно застосовуваних теплообмінних поверхонь і поверхонь із розглянутих композитів виконувався в широкому діапазоні зміни навантаження котлоагрегату та значень температур відхідних газів в номінальному режимі його роботи. До того ж враховувалося, що за регламентом при зменшенні навантаження котла до 50 % відбувається його переведення в номінальний режим роботи з подальшим зниженням навантаження відповідно до температури навколишнього середовища.

Як основні показники для порівняння ефективності теплообмінних поверхонь використовувалися такі: питома теплопродуктивність Q^* (теплопродуктивність на одиницю маси теплообмінної поверхні), відносний об'єм V^* і собівартість C^* (об'єм і собівартість поверхні нагрівання на одиницю теплопродуктивності) та ін. Вказана питома теплопродуктивність Q^* характеризує теплову ефективність утилізаторів на одиницю їхньої маси. Відносний об'єм V^* є важливим показником компактності теплоутилізаційного устаткування. Значення цього показника набуває особливого значення за умови обмежених площ котельні і має враховуватися при проектуванні систем теплоутилізації.

В ході досліджень розгляду підлягали традиційно використовувані повітрогрійні теплообмінники з

нержавіючої сталі: пакети пластин та пучки труб з КТП при течії повітря всередині труб, а димових газів – в міжтрубному просторі. Крім того досліджувалися пакети пластин з полімерних мікро- і нанокомпозитів. Товщина пластин з нержавіючої сталі становила 2 мм, з композитів – 4 мм. Для трубних пучків використовувалися труби з зовнішнім діаметром 31 мм і внутрішнім 25 мм. Застосовувані пучки труб з КТП забезпечували збільшення коефіцієнту тепловіддачі з боку нагріваного повітря в 1,5 рази порівняно з гладкими трубами.

Композит, необхідний для повітрогрійного теплообмінника теплоутилізаційної установки, вибирався, по-перше, з умови відповідності діапазону його робочих температур і крім того необхідні теплопровідні властивості композиту знаходилися за значеннями однієї або декількох характеристик теплообмінних апаратів, які в рамках ситуацій, що розглядаються, вважались визначальними. З огляду на вищевикладене в ході досліджень особлива увага приділялася розрахункам теплового стану робочих поверхонь повітрогрійних теплоутилізаторів.

При виборі композиційного матеріала для теплообмінної поверхні використовувалися результати виконаних експериментальних досліджень концентраційної залежності коефіцієнтів теплопровідності композитів (рис. 1).

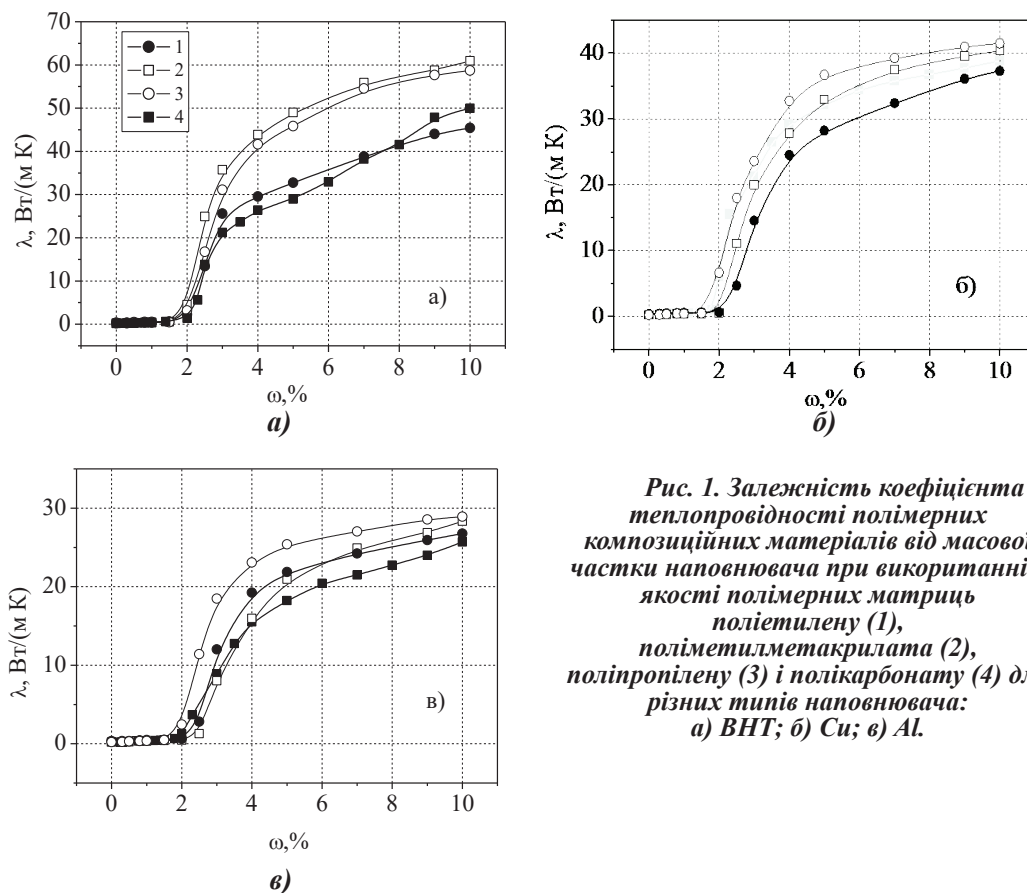


Рис. 1. Залежність коефіцієнта теплопровідності полімерних композиційних матеріалів від масової частки наповнювача при використанні в якості полімерних матриць поліетилену (1), поліметилметакрилата (2), поліпропілену (3) і полікарбонату (4) для різних типів наповнювача: а) ВНТ; б) Si; в) Al.

В таблиці 1 наводяться вихідні дані для проведення розрахункових досліджень щодо порівняльного аналізу основних характеристик різних типів повітрогрійних теплоутилізаторів.

Виконувались також розрахунки при різних рівнях температури відхідних газів у номінальному режимі роботи котла – 150...200 °С.

Таблиця 1. Вихідні дані для розрахунку характеристик повітрогрійних теплообмінників при використанні полімерних мікро- і нанокompозитів і традиційно застосовуваних матеріалів

Найменування параметра	Значення
Навантаження котла, %	30...100
Теплопродуктивність котла в номінальному режимі, МВт	2,0
Витрата природного газу, м ³ /год	70...200
Витрата димових газів, кг/с	0,3...0,9
Температура газів на виході з котла в номінальному режимі, °С	156
Коефіцієнт надлишку повітря	1,1
Вологовміст газів на виході з котла, кг /кг с.г.	0,135
Температура навколишнього середовища, °С	-20...+10
Розрахункова температура повітря для системи опалення, °С	-20
Розрахунковий перепад температур для системи опалення Δt_o , °С	25
ККД котла без теплоутилізаторів за нижчою теплотою згоряння палива, %	92...94

Щодо застосовуваних полімерних композитів, то їх коефіцієнти теплопровідності варіювались при розрахунках діапазонів 0,2...30 Вт/м·К. Перше з вказаних значень відповідає коефіцієнту теплопровідності ненаповненої полімерної матриці, друге – нержавіючій сталі.

В ході досліджень, як вже зазначалося, моделювалися різні навантаження котла (від 30 до 100 %) за тепломережним графіком відповідно до температури навколишнього середовища t_{nc} .

Результати досліджень

Характерні результати виконаних досліджень наводяться на рис. 2 – 7. Рис. 2 ілюструє залежність $Q^* = f(t_{nc})$ для розглянутих теплообмінних поверхонь повітрогрійного теплоутилізатора. Як видно, питома теплопродуктивність теплоутилізаторів із поверхнями нагріву з полімерних композиційних матеріалів суттєво (більш ніж в 3 рази) перевершує відповідний показник для поверхонь з нержавіючої сталі в усьому діапазоні навантажень котла. Це пов'язано значною мірою з низькою питомою вагою полімерних композитів, яка більш ніж в 6 разів менша питомої ваги нержавіючих сталей. Звертає на себе увагу той факт, що зміна коефіцієнта теплопровідності композитів в діапазоні $\lambda = 1...30$ Вт/(м·К) має незначний вплив на питому теплопродуктивність утилізатора теплоти. Остання знижується менш ніж на 5 % при

зменшенні λ в указаному діапазоні. Це пов'язано з тим, що в повітрогрійних теплоутилізаторах роль термічного опору теплопровідності стінки теплообмінної поверхні в процесі теплопередачі є відносно незначною через порівняно великі значення термічного опору тепловіддачі як з боку димових газів, так і нагріваного повітря. Щодо ненаповнених полімерів, то, як випливає з одержаних даних, їх застосування також забезпечує значне підвищення питомої теплопродуктивності теплоутилізаторів в порівнянні з традиційним використанням поверхонь з нержавіючих сталей.

Згідно з наведеними даними, відносний об'єм повітрогрійних теплоутилізаторів із розглянутих полімерних мікро- і нанокompозитів виявляється помітно більшим, ніж у разі пластинчастих теплоутилізаторів із нержавіючої сталі, і близьким (але меншим) за величиною для ситуації використання пучків труб з КТП. Тобто за компактністю теплоутилізаційного обладнання пластинчасті теплообмінники з полімерних композитів у розглянутих умовах дещо програють традиційним пластинчастим теплообмінникам з нержавіючої сталі і зрівняні за цим показником з пучками труб з КТП.

Таким чином, застосування полімерних композитів для виготовлення повітрогрійних теплоутилізаторів є перспективним з огляду на високу теплову ефективність таких утилізаторів та цілком задовільну компактність.

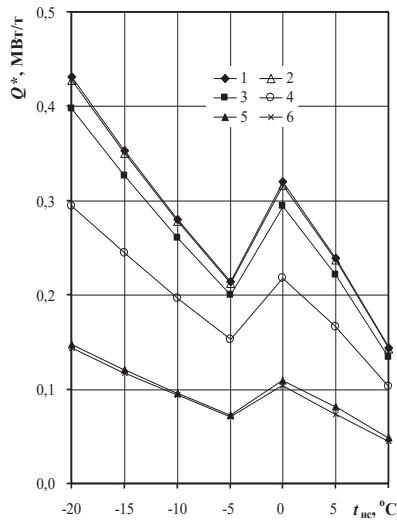


Рис. 2. Залежність питомої теплопродуктивності Q^* повітрянагрівача від температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ при застосуванні різних поверхонь теплообміну:
1-4 – пакети пластин із нанокompозитів ($\lambda = 30, 5, 1, 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$);
5, 6 – пакети пластин та пучки труб з КТП із нержавіючої сталі ($\lambda = 30 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$).

Рис. 3 ілюструє картину зміни відносного об'єму повітрогрійних теплоутилізаторів в залежності від температури навколишнього середовища.

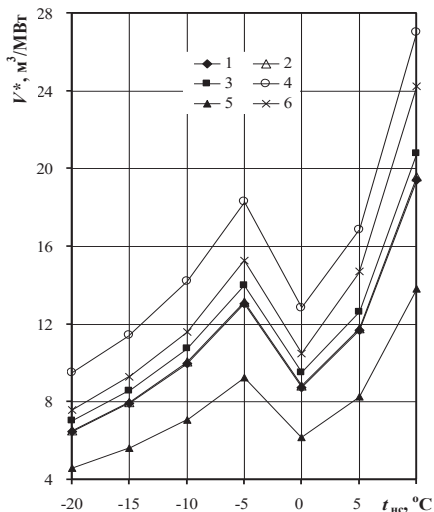


Рис. 3. Залежність відносного об'єму V^* повітрянагрівача від температури навколишнього середовища $t_{\text{нс}}$ при застосуванні різних поверхонь теплообміну:
1-4 – пакети пластин із нанокompозитів ($\lambda = 30, 5, 1, 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$);
5, 6 – пакети пластин та пучки труб з КТП із нержавіючої сталі ($\lambda = 30 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$).

На рис. 4 наведено залежність питомої теплопродуктивності теплоутилізаторів від температури $t_{\text{Г}}^{\text{н}}$ відхідних газів котла в номінальному режимі для розглянутих типів теплообмінних поверхонь. Як видно, зазначена теплопродуктивність лінійно зростає з підвищенням температури $t_{\text{Г}}^{\text{н}}$. При цьому для теплообмінних поверхонь з полімерних композитів має місце більша чутливість Q^* до зміни температури $t_{\text{Г}}^{\text{н}}$.

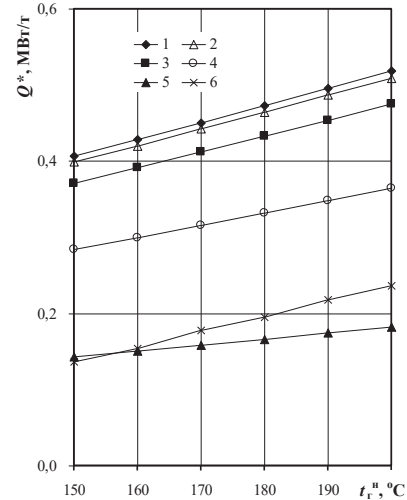


Рис. 4. Залежність питомої теплопродуктивності Q^* повітрянагрівача від температури відхідних газів $t_{\text{Г}}^{\text{н}}$ у номінальному режимі котла при застосуванні різних поверхонь теплообміну:
1-4 – пакети пластин із нанокompозитів ($\lambda = 30, 5, 1, 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$);
5, 6 – пакети пластин та пучки труб з КТП із нержавіючої сталі ($\lambda = 30 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$).

Залежність відносного об'єму повітрогрійного теплоутилізатора від температури відхідних газів котла в номінальному режимі для різних теплообмінних поверхонь ілюструє рис. 5. Згідно з одержаними результатами величина V^* суттєво знижується при збільшенні температури $t_{\text{Г}}^{\text{н}}$. При цьому співвідношення значень V^* для різних теплообмінних поверхонь залишається незмінним в усьому діапазоні температур $t_{\text{Г}}^{\text{н}}$.

Результати розрахункових досліджень з визначення максимальної температури стінок $t_{\text{пов}}^{\text{max}}$ теплообмінних поверхонь повітропідігрівачів наведено на рис. 6. При цьому дані на рис. 6, б відповідають вдвічі більшій площі теплообмінної поверхні, ніж на рис. 6, а. Наведені результати, як вже зазначалося, слугують вибору полімерної матриці для композиційного матеріалу. Представлені дані свідчать про те, що вказана максимальна температура суттєво зростає зі збільшенням температури відхідних димових газів котла в номінальному режимі. У розглянутих умовах (див. рис. 6, а) $t_{\text{пов}}^{\text{max}}$ змінюється від 103 до 189 °C при підвищенні температури $t_{\text{Г}}^{\text{н}}$ від 150 до 250 °C.

Щодо вибору полімерних матриць для композиційних матеріалів, то він визначається максимальною темпера-

турою експлуатації полімеру. Остання становить 115 °С для поліетилену і поліметилметакрилату, 155 °С – для поліпропілену і 195 °С – для полікарбонату.

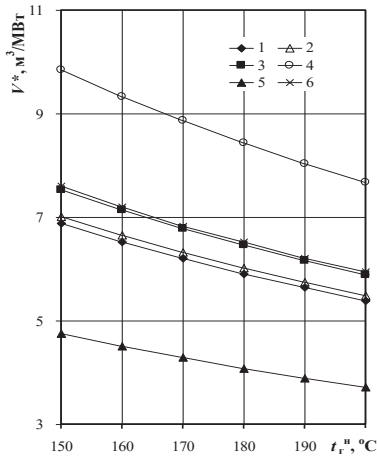
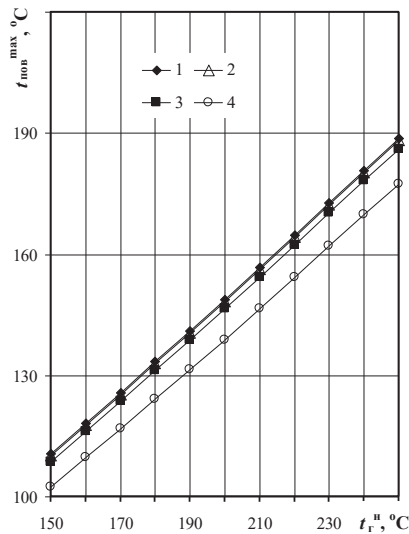


Рис. 5. Залежність відносного об'єму V^* повітрянагрівача від температури відхідних газів t_g^H у номінальному режимі котла при застосуванні різних поверхонь теплообміну:
 1-4 – пакети пластин із нанокompозитів ($\lambda = 30, 5, 1, 0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$);
 5, 6 – пакети пластин та пучки труб з КТП із нержавіючої сталі ($\lambda = 30 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$).

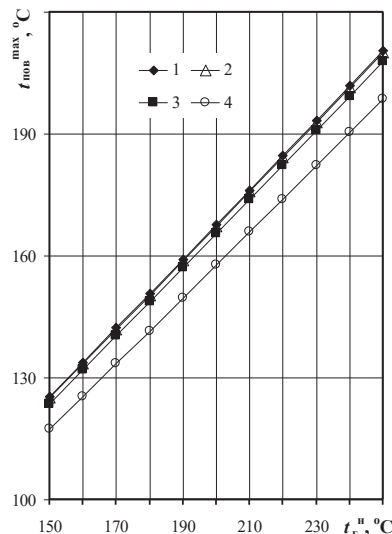
Тобто при значеннях температури $t_{\text{пов}}^{\text{max}}$, що не перевищують 115 °С, як полімерну матрицю доцільно обирати поліетилен або поліметилметакрилат, при $115 \text{ °С} < t_{\text{пов}}^{\text{max}} \leq 155 \text{ °С}$ – поліпропілен, а при $t_{\text{пов}}^{\text{max}} > 155 \text{ °С}$ – полікарбонат. Як видно з рис. 6, а, вказаним діапазоном зміни $t_{\text{пов}}^{\text{max}}$ відповідають певні діапазони температур t_g^H . Так, згідно з даними, наведеними на рис. 6, а, для полімерного композиту з $\lambda = 30 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$ слід застосовувати полімерну матрицю з поліетилену або поліметилметакрилату при $150 \text{ °С} \leq t_g^H \leq 160 \text{ °С}$; в діапазоні температур $160 \text{ °С} < t_g^H < 210 \text{ °С}$ – полімерну матрицю з поліпропілену і для $t_g^H > 210 \text{ °С}$ – матрицю з полікарбонату. Для полімерного композиту з меншими значеннями λ вказані діапазони температури t_g^H дещо зміщуються в область більш високих значень.

При збільшенні площі теплообмінної поверхні повітряогріючого теплоутилізатора діапазони t_g^H , що відповідають зонам доцільного застосування певних полімерних матриць, навпаки, зміщуються в область менших величин (див. 6, б).

Рис. 7 ілюструє результати виконаних досліджень щодо вартісних показників повітряогріючих теплообмінних апаратів. Собівартість металевих теплообмінних поверхонь приймалася за даними підприємств виготовлювачів цих поверхонь. Щодо полімерних композитів, то розглядалася ситуація, коли використовувався поліетилен, наповнений ВНТ.



а)



б)

Рис. 6. Залежність максимальної температури $t_{\text{пов}}^{\text{max}}$ поверхні теплообміну пластинчатого повітрянагрівача із нанокompозитів від температури t_g^H відхідних газів котла в номінальному режимі при різних значеннях коефіцієнта теплопровідності її матеріалу:
 а) для площ поверхонь F , що відповідають даним рис. 2 – 5;
 б) для площ поверхонь, що відповідають $2F$;
 1 – $\lambda = 30 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, 2 – $5 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, 3 – $1 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$, 4 – $0,2 \text{ Вт/(м}\cdot\text{К)}$.

Собівартість композитів визначалася за ціною їхніх компонентів на Лондонській біржі та вартістю технології їх виготовлення. Щодо ранжування теплообмінних поверхонь за показником C^* , то найвищою відносна вартість C^* є для пакетів пластин з нержавіючої сталі, дещо нижчою – для пучків труб з КТП, і найнижчою – для пакетів пластин з полімерних композиційних

матеріалів та ненаповненого полімеру.

Стосовно ранжування теплообмінних поверхонь з полімерних композитів за показником C^* , то згідно з одержаними даними зі збільшенням коефіцієнта теплопровідності композиту, а відтак і порівняно дороговартісного наповнювача, відносна вартість поверхні зростає.

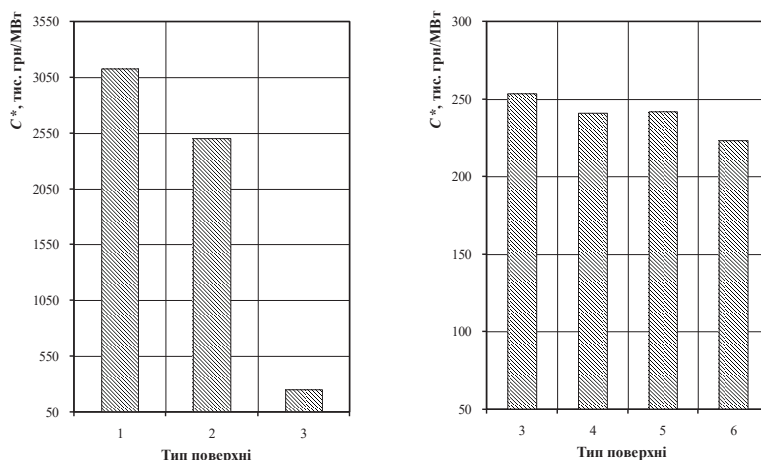


Рис. 7. Відносна собівартість повітронігрівачів при застосуванні різних поверхонь теплообміну:
 1, 2 – пакети пластин і трубні пучки з КТП з нержавіючої сталі ($\lambda = 30 \text{ Вт/(м·К)}$);
 3, 4, 5 – пакети пластин з композитів на основі поліетилену, наповнених ВНТ, при значеннях їх коефіцієнта теплопровідності 30; 5; 1 Вт/(м·К) ;
 6 – пакети пластин з поліетилену.

Висновки

За результатами виконаних досліджень показано, що газо-газові теплообмінні апарати з полімерних мікро- і нанокомпозитів мають суттєві переваги над традиційно застосовуваними теплообмінниками даного типу. А саме:

1. Питома теплопродуктивність розглянутих теплообмінних апаратів з полімерних композиційних матеріалів більш ніж в три рази перевищує цей показник для поверхонь з нержавіючої сталі.

2. Відносний об'єм пластинчастих газо-газових теплообмінників з полімерних композитів дещо менший за величиною ніж для пучків труб з КТП, тобто газо-газові теплообмінники з полімерних композиційних матеріалів є компактнішими.

3. Відносна собівартість теплообмінників газо-газового типу з полімерних нанокомпозитів є більш ніж на порядок меншою у порівнянні з традиційно застосовуваними теплообмінниками з нержавіючої сталі.

ЛІТЕРАТУРА

1. Diaz-Bleis D., Vales-Pinzón C., Freile-Peagrín Y., Alvarado-Gil J.J. Thermal characterization of magnetically

aligned carbonyl iron/agar composites, Carbohydrate Polymers, 2014, Vol. 99, p. 84-90. (Eng.)

2. Samanvaya S., Jennifer L. Schaefer, Zichao Yang, Zhengyuan Tu, Lynden A. Archer. Polymer-Particle Composites: Phase Stability and Applications in Electrochemical Energy Storage, Advanced Material, 2014, Vol. 26, p. 201-234. (Eng.)

3. Parvathalu Kalakonda, Yanial Cabrera, Robert Judith, Georgi Y. Georgiev, Peggy Cebe, Germano S. Iannacchione. Studies of Electrical and Thermal Conductivities of Sheared Multi-Walled Carbon Nanotube with Isotactic Polypropylene Polymer Composites, Nanomaterials and Nanotechnology, 2015, Vol. 5, p. 1-7. (Eng.)

4. Kingshuk Dutta, Piyush Kumar, Suparna Das, Patit P. Kundu. Utilization of Conducting Polymers in Fabricating Polymer Electrolyte Membranes for Application in Direct Methanol Fuel Cells, Polymer Reviews, 2014, Vol. 54, p. 1-32. (Eng.)

5. Долинский А.А., Фиалко Н.М., Динжос Р.В., Навродская Р.А. Теплофизические характеристики высокотеплопроводных полимерных микро- и нанокомпозитов, Промышленная теплотехника, 2015, № 5, с. 5-14.

**THE EFFICIENCY OF USING POLYMERIC
MICRO- AND NANOCOMPOSITES FOR HEAT
EXCHANGERS OF GAS-GAS TYPE**

**Fialko N.M.¹, Navrodskaia R.A.¹, Dinzhos R.V.²,
Meranova N.O.¹, Shevchuk S.I.¹**

¹Institute of Engineering Thermophysics, National
Academy of Sciences of Ukraine,
2a, Zhelyabova str., Kyiv, 03680, Ukraine

²Nikolaev National University named after V.A.
Sukhomlinskiy, 24,
Nikolska str., Mykolaev, 540030, Ukraine

The results of the analysis of the prospects for the use of polymer micro- and nanocomposites for the fabrication of gas-gas heat exchangers are given. The data of comparison of heat exchange characteristics of polymer composites surfaces with corresponding parameters for traditionally applied surfaces are presented. It is shown that gas-gas heat exchangers made of polymeric micro- and nanocomposites have advantages in comparison with traditionally used heat exchangers of this type for such parameters as specific heating capacity (heat productivity per unit mass of the heat exchange surface), relative volume and cost (volume and cost of heat exchange surfaces per unit of heat productivity), etc.

Reference 11, figure 7, tabl. 1.

Key words: polymeric micro- and nanocomposites, heat exchange surfaces, carbon nanotubes.

1. Diaz-Bleis D., Vales-Pinzón C., Freile-Pelegrín Y., Alvarado-Gil J.J. Thermal characterization of magnetically aligned carbonyl iron/agar composites, *Carbohydrate Polymers*, 2014, Vol. 99, p. 84-90. (Eng.)

2. Samanvaya S., Jennifer L. Schaefer, Zichao Yang, Zhengyuan Tu, Lynden A. Archer. Polymer-Particle Composites: Phase Stability and Applications in Electrochemical Energy Storage, *Advanced Material*, 2014, Vol. 26, p. 201-234. (Eng.)

3. Parvathalu Kalakonda, Yanial Cabrera, Robert Judith, Georgi Y. Georgiev, Peggy Cebe, Germano S. Iannacchione. Studies of Electrical and Thermal Conductivities of Sheared Multi-Walled Carbon Nanotube with Isotactic Polypropylene Polymer Composites, *Nanomaterials and Nanotechnology*, 2015, Vol. 5, p. 1-7. (Eng.)

4. Kingshuk Dutta, Piyush Kumar, Suparna Das, Patit P. Kundu. Utilization of Conducting Polymers in Fabricating Polymer Electrolyte Membranes for Application in Direct Methanol Fuel Cells, *Polymer Reviews*, 2014, Vol. 54, p. 1-32. (Eng.)

5. Dolinsky A.A., Fialko N.M., Dinzhos R.V., Navrodskaia R.A. Thermophysical characteristics of high-conductivity polymeric micro- and nanocomposites, *Promyshlennaya teplotekhnika [Industrial Heat Engineering]*, 2015, № 5, p. 5-14. (Rus.)

*Получено 04.12.2017
Received 04.12.2017*